

KfK 2580
April 1978

Uranisotopenentmischung in der Trenndüse bei Rückstau der schweren Fraktion

P. Bley, W. Ehrfeld, U. Heiden
Institut für Kernverfahrenstechnik

Kernforschungszentrum Karlsruhe

Als Manuskript vervielfältigt
Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor

KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE GMBH

KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE
Institut für Kernverfahrenstechnik

KfK 2580

URANISOTOPENENTMISCHUNG IN DER TRENNDÜSE
BEI RÜCKSTAU DER SCHWEREN FRAKTION

P. Bley
W. Ehrfeld
U. Heiden

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe

Zusammenfassung:

Beim Trenndüsenverfahren zur Anreicherung von Uran-235 wird das Stromaufteilungsverhältnis (cut) der Trennelemente in einer Kaskade durch Rückstauen des Gasstroms der schweren Fraktion eingestellt. Dieser Regelvorgang beeinflusst die Strömungsverhältnisse in der Trenndüse unmittelbar und kann deshalb die Trenneigenschaften des Systems merklich verändern.

In der vorliegenden Arbeit wird auf der Grundlage von Trennversuchen mit H_2/UF_6 -Gemischen untersucht, wie sich ein Rückstau der schweren Fraktion auf die Isotopenentmischung und auf das für den Kaskadenbetrieb wichtige Regelverhalten des Trennelements auswirkt. Im Hinblick auf die technische Anwendung des Trenndüsenverfahrens, bei der Trenndüsenysteme mit extrem kleinen charakteristischen Abmessungen zum Einsatz kommen, wird im Rahmen der Untersuchungen auch der Einfluß von Fertigungstoleranzen auf die Trenneigenschaften bei Rückstau eingehend behandelt.

Aus den Untersuchungen geht hervor, daß durch Rückstau der schweren Fraktion der Elementareffekt der Isotopentrennung um bis zu 5 % ansteigt, wobei sich die optimalen Betriebsbedingungen in erster Näherung nicht ändern. Dieser Anstieg des Trenneffekts wird nicht nur bei toleranzfreien Trennelementen sondern auch bei Trennelementen mit Toleranzschwankungen der Abschälerposition beobachtet. Toleranzschwankungen der Düsenweite können hingegen in ihrer negativen Wirkung durch Rückstau verstärkt werden. Bezüglich des Regelverhaltens der Trenndüse wurde festgestellt, daß bei Rückstau das UF_6 -Abschälverhältnis auf Änderungen der Betriebsdrücke empfindlicher, hingegen auf Änderungen der UF_6 -Konzentration weniger empfindlich reagiert als bei einer nicht rückgestauten Strömung.

Influence of Throttling of the Heavy Fraction on the Uranium Isotope Separation in the Separation Nozzle

Summary

In a separation nozzle cascade for enrichment of U-235 the cut of the separation elements is adjusted by throttling the heavy fraction. This control process influences directly the flow properties in the nozzle and may noticeably change its separation characteristics.

This paper deals with an experimental investigation of the throttling effect on the separation and control characteristics of the separation nozzle operated with a H_2/UF_6 mixture. In consideration of the extremely small characteristic dimensions of commercial separation nozzle elements the influence of manufacturing tolerances on the characteristics of the throttled nozzle was analysed in detail.

It appears, that the elementary effect of isotope separation increases by throttling of the heavy fraction up to 5 % without changing the optimum operating conditions. This increase of the elementary effect is not only obtained for separation nozzles with zero tolerances but also for separation nozzles having finite tolerances of the skimmer position. Tolerances of the nozzle width, however, become increasingly detrimental, when the heavy fraction is throttled. Regarding the control characteristics of the separation nozzle it was found out, that the UF_6 -cut of the throttled nozzle reacts more sensitively to alterations of the operating pressures and less sensitively to alterations of the UF_6 -concentration of the process gas mixture.

Inhaltsverzeichnis

| | <u>Seite</u> |
|---|--------------|
| 1. Einleitung und Zusammenfassung | 1 |
| 2. Apparatur und Meßverfahren | 5 |
| 3. Einfluß des Rückstaus auf das Betriebsverhalten toleranzfreier Trennelemente | 10 |
| 3.1 Einfluß auf das UF_6 -Abschälverhältnis bei verschiedenen Abschälerweiten | 10 |
| 3.2 Einfluß auf die Trenneigenschaften | 14 |
| 4. Einfluß des Rückstaus auf das Betriebsverhalten toleranzbehafteter Trennelemente | 20 |
| 4.1 Berechnung der zu erwartenden Vermischungsverluste | 20 |
| 4.2 Trennversuche an toleranzbehafteten Trennelementen | 24 |
| 5. Einfluß des Rückstaus auf die Regelcharakteristik des UF_6 -Abschälverhältnisses | 28 |
| 6. Diskussion der Ergebnisse | 32 |
| 7. Literaturverzeichnis | 36 |

1. Einleitung und Zusammenfassung

Das Trenndüsenverfahren, das im Kernforschungszentrum Karlsruhe entwickelt wird, gehört neben dem etablierten Gasdiffusionsverfahren und dem Zentrifugenverfahren zu den Methoden, die heute für die kommerzielle Urananreicherung in Betracht kommen /1/.

Zur Entmischung der Uranisotope U-235 und U-238 werden beim Trenndüsenverfahren die in einer gekrümmten Strömung auftretenden Zentrifugalkräfte ausgenutzt, die bei den zur Zeit eingesetzten industriellen Trennelementen durch Umlenkung eines Gasstroms L an einer festen Wand erzeugt werden (Abb. 1). Am Ende der Umlenkung wird der

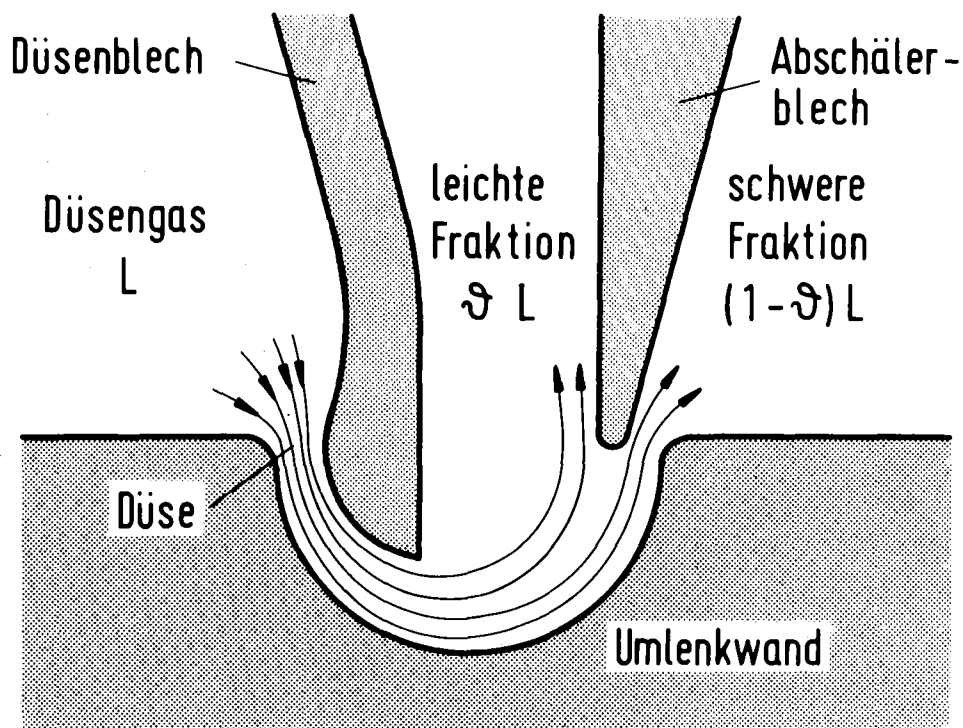


Abb. 1: Schnitt durch eine schlitzförmige Trenndüse mit schematischer Darstellung der Stromlinien.

Gasstrom L durch einen Abschäler in die an U-235 angereicherte leichte Fraktion $\mathfrak{J}L$ und in die an U-235 abgereicherte schwere Fraktion $(1 - \mathfrak{J})L$ aufgeteilt. Die Größe \mathfrak{J} wird als Abschälverhältnis bezeichnet.

Als Verfahrensgas wird gasförmiges Uranhexafluorid verwendet, dem man ein leichtes Zusatzgas (H_2 oder He) in hohem molaren Überschuß (95 - 97 %) beimischt, um bereits bei relativ geringer Expansion des Gasgemisches hohe Strömungsgeschwindigkeiten und dementsprechend große Zentrifugalkräfte für die Trennung der Uranisotope zu erreichen. Ein weiterer Vorteil des Zusatzgases besteht darin, die Sedimentation des leichten Isotops im Zentrifugalfeld gegenüber dem schweren Isotop zu verzögern. Dadurch können Trenneffekte erzielt werden, die größer sind, als es der Gleichgewichtsverteilung der Isotope im Zentrifugalfeld der Strömung entspricht /2/, /3/.

Um die für Reaktorbrennstoff erforderliche Anreicherung an dem leichten Uranisotop U-235 zu erzielen, muß eine industrielle Urananreicherungsanlage nach dem Trenndüsenverfahren, ebenso wie bei den anderen Anreicherungsverfahren, als Kaskade aufgebaut werden, in der einige hundert Trennstufen in Serie zusammengeschaltet sind.

Durch den Kaskadenaufbau ist für das UF_6 -Abschälverhältnis ein Sollwert festgelegt. Dieser ist in jeder Trennstufe möglichst exakt einzuregulieren, um Wertverluste durch Vermischen von UF_6 -Strömen ungleicher Uranisotopenkonzentrationen soweit wie möglich zu vermeiden. Die notwendige Feinregulierung des UF_6 -Abschälverhältnisses erfolgt durch Rückstau der schweren Fraktion, indem man durch geeignete Wahl des Abschälerabstandes zur Umlenkwand zunächst einen etwas zu großen Gasdurchsatz durch die schwere Fraktion einstellt, welcher dann durch ein

Regelventil auf den Sollwert gedrosselt wird /4/. Hierbei steigt der Druck in der schweren Fraktion deutlich über den Ansaugdruck des Verdichters, d. h. den Absaugdruck der leichten Fraktion an. Dieser Druckunterschied kann durch ein Regelventil mit geeignetem Durchsatzverhalten zu einer Verbesserung der Stabilität der Kaskade ausgenutzt werden /5/.

Da bei den früheren Untersuchungen keine weiteren außerhalb der Fehlergrenze liegenden Effekte des Rückstaus auf die Trenneigenschaften der Trenndüse gefunden wurden, erfolgte die wirtschaftliche Optimierung zunächst ohne Rückstau der schweren Fraktion /6/. Wegen der grundlegenden Bedeutung des Rückstaus für den Betrieb der Trenndüsenkaskade ist jedoch eine genaue Kenntnis des Trennverhaltens der Trenndüse bei Rückstau der schweren Fraktion notwendig. Daher wurde in der vorliegenden Arbeit unter Laborbedingungen mit H_2/UF_6 -Gemischen experimentell untersucht, wie der Rückstau der schweren Fraktion die Trennleistung der Trenndüse beeinflusst, wie sich Toleranzschwankungen von Geometrieparametern bei Rückstau auf die Uranisotopenentmischung auswirken und welchen Einfluß der Rückstau auf die für das Betriebsverhalten der Kaskade wesentliche Regelcharakteristik des UF_6 -Abschälverhältnisses hat.

Aus den Experimenten geht hervor, daß Rückstau der schweren Fraktion den Elementareffekt der Isotopentrennung bis zu 5 % erhöht. Da der Elementareffekt der Isotopentrennung quadratisch in die Trennleistung eingeht, steigt die Trennleistung der Trenndüse bis zu 10 % an. Weiter zeigt sich, daß sich durch Rückstau die optimalen Betriebsbedingungen in erster Näherung nicht verändern.

Toleranzschwankungen von Geometrieparametern, die bei der Herstellung von technischen Trennelementen wegen der Kleinheit der charakteristischen Abmessungen auftreten können, wurden am Beispiel der Düsenweite und der Abschälerweite untersucht. Hierbei zeigte sich, daß sich der durch Rückstau mögliche Anstieg des Isotopentrenneffekts durch Toleranzschwankungen der Düsenweite vermindert. Abschälerweitenschwankungen, welche bei nicht zurückgestauter Strömung die Uranisotopenentmischung am massivsten beeinträchtigen, wirken sich innerhalb der Meßgenauigkeit nicht auf den Anstieg des Isotopentrenneffekts durch Rückstau aus.

Die Messungen zeigen weiter, daß bei einer zurückgestauten Strömung das UF_6 -Abschälverhältnis auf Änderungen des Einlaßdrucks und des Expansionsverhältnisses der leichten Fraktion empfindlicher, hingegen auf Änderungen der UF_6 -Konzentration weniger empfindlich als ohne Rückstau reagiert, was bei Ausnutzung des Rückstaus zur Stabilisierung der Kaskade berücksichtigt werden muß.

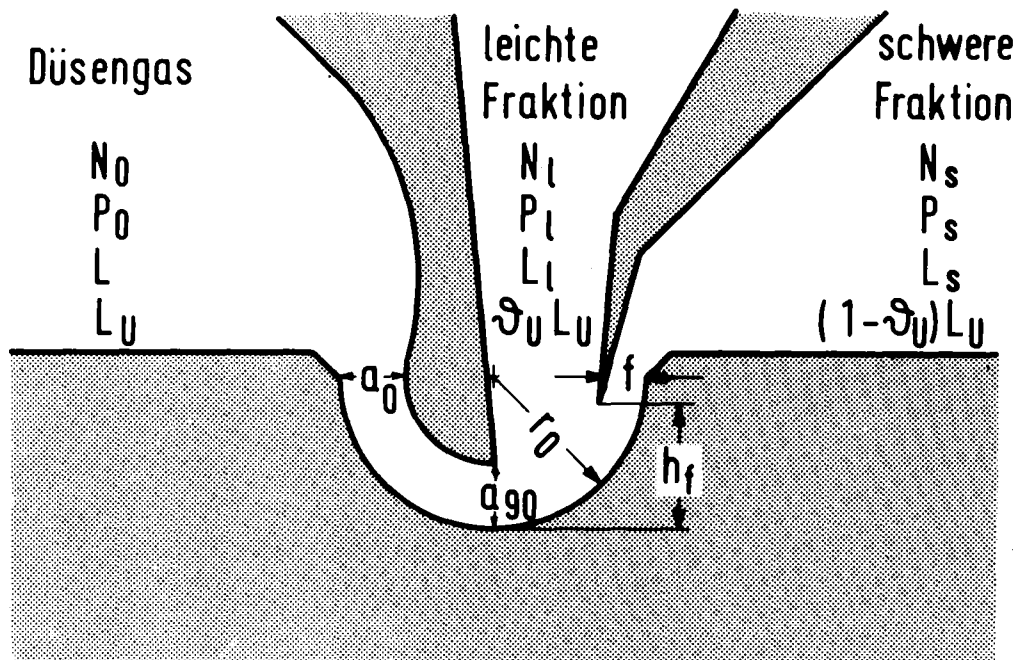
2. Apparatur und Meßverfahren

Die Untersuchungen wurden mit H_2/UF_6 -Gemischen unter Laborbedingungen an kurzen Trenndüsenabschnitten mit Schlitzlängen von $l = 10 - 22$ mm durchgeführt, bei welchen die Trenndüsengeometrie gegenüber den heute gebräuchlichen technischen Trennelementen 7.5fach vergrößert war. Dadurch können bei diesen Laborelementen die charakteristischen Abmessungen praktisch toleranzfrei ($\pm 2 \mu$) über die gesamte Schlitzlänge eingehalten oder auch gezielt Toleranzschwankungen einzelner Geometrieparameter simuliert werden. Die Abschälerschneide ist bei diesen Laborelementen mit Verrundungsradien von $5 - 10 \mu$ nahezu ideal spitz.

In Abb. 2 sind die Geometrieparameter der untersuchten Trennelemente und die in der Arbeit verwendeten Bezeichnungen zusammengestellt.

Die Apparatur, die zur Durchführung der Trennversuche mit H_2/UF_6 -Gemischen zur Verfügung stand, ist in dem Blockschaltbild in Abb. 3 dargestellt: Die obere Bildhälfte zeigt das Fließschema des mechanischen Teils der Apparatur. Auf der unteren Bildhälfte ist links die "on line" Meßwertverarbeitung mit einer elektronischen Datenerfassung für externe Computerauswertung der Meßwerte eingezeichnet und rechts das Massenspektrometer zur Uranisotopenanalyse mit automatischer Probenentnahme dargestellt /6/, /7/.

Bei den Trennversuchen wird das Verfahrensgas aus einem Vorratsbehälter über ein Regelventil dem Trennelement zugeführt und dort in eine leichte und eine schwere Fraktion aufgeteilt. Der Abstand f des Abschälers zur Umlenkwand kann während des Versuchs von außen eingestellt



Geometrieparameter

| | | | |
|----------------|----------|---|---------------|
| Umlenkradius | r_0 | = | 0.75 mm |
| Düsenweite | a_0 | = | 0.3 mm |
| | a_{90} | = | 0.3 - 0.33 mm |
| Abschälerweite | f | = | 0.1 - 0.25 mm |
| Abschälerhöhe | h_f | = | 0.6 - 0.66 mm |
| Schlitzlänge | l | = | 10 - 22 mm |

Betriebsparameter

| | |
|--|--------------------|
| Durchsatz | L, L_l, L_s |
| UF ₆ -Durchsatz, -Abschälverhältnis | L_u, ϑ_u |
| UF ₆ -Konzentration | N_0, N_l, N_s |
| Druck | P_0, P_l, P_s |

Abb. 2: Bezeichnungen und charakteristische Abmessungen der untersuchten Trennelemente.

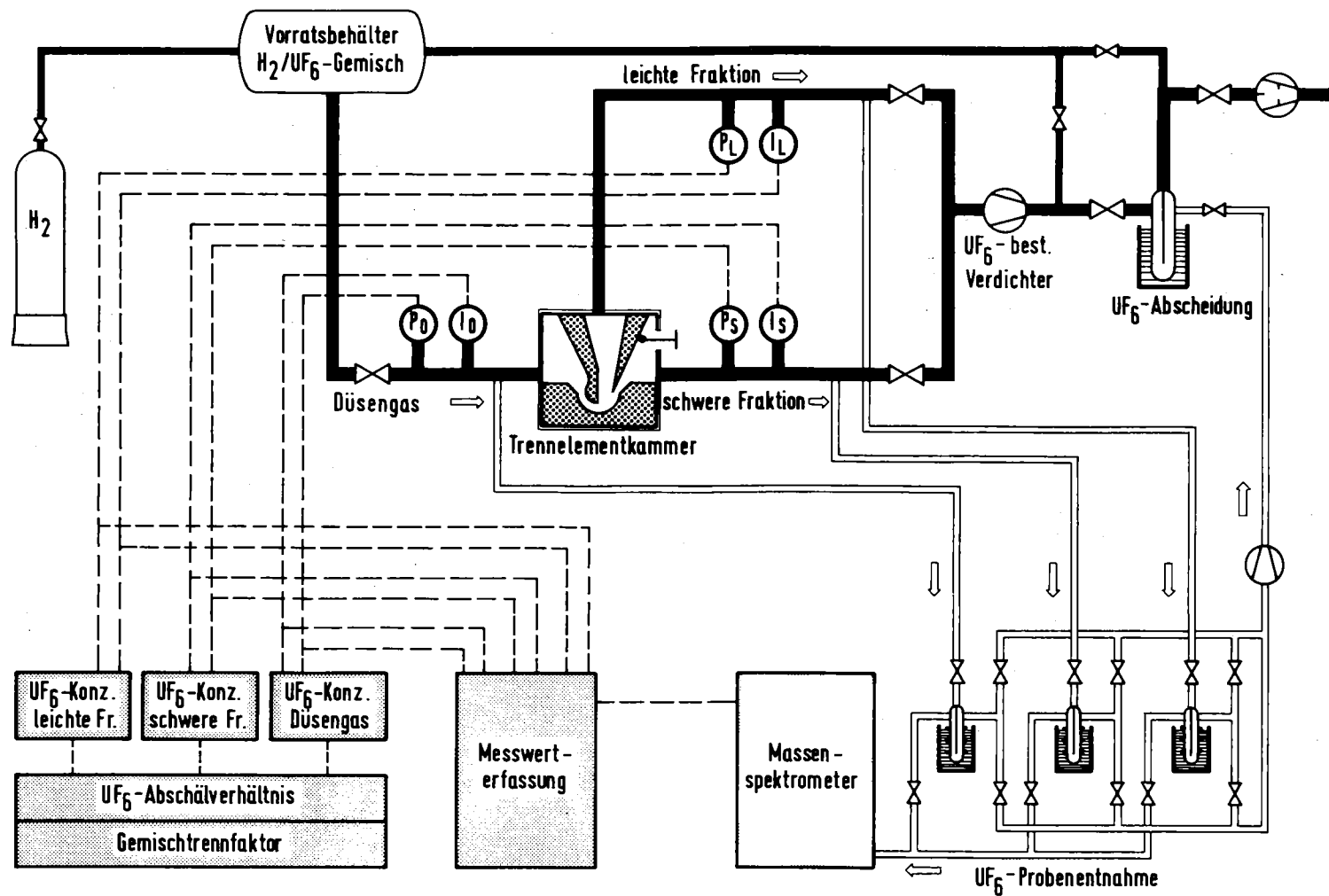


Abb. 3: Blocksaltbild der Trennapparatur.

und auf $\pm 5 \mu$ bestimmt werden. Stromabwärts von den Regelventilen für die Absaugdrucke von leichter und schwerer Fraktion werden beide Fraktionen wieder zusammengeführt. Das UF_6 des Gasgemisches wird in Tieftemperaturkühlfallen abgeschieden und das Zusatzgas wird nach außen abgepumpt.

Bei allen in das Trennelement ein- und ausströmenden Fraktionen werden die Drucke P und die Ionisierbarkeit I des Verfahrensgases bezüglich α -Strahlung gemessen. Die Meßgrößen werden in Analog-Rechenstufen unmittelbar weiterverarbeitet, welche dann die UF_6 -Konzentrationen N_0 , N_1 , N_s der einzelnen Fraktionen liefern. Aus diesen Konzentrationen werden das UF_6 -Abschälverhältnis ϑ_u und der Gemischtrennfaktor A berechnet:

$$UF_6\text{-Abschälverhältnis: } \vartheta_u = \frac{N_1}{N_0} \frac{N_s - N_0}{N_s - N_1} \quad (1)$$

$$\text{Gemischtrennfaktor: } A = \frac{1 - N_1}{N_1} \frac{N_s}{1 - N_s} \quad (2)$$

Aus dem Düsengas, der leichten Fraktion und der schweren Fraktion werden mit einem automatischen Probenentnahmesystem UF_6 -Proben entnommen. Diese werden mit einem direkt angeschlossenen Massenspektrometer auf ihre Uranisotopenkonzentrationen analysiert.

Die Entmischung der Uranisotope U-235 und U-238 wird durch den Elementareffekt ϵ_A der Isotopentrennung beschrieben, der aus den Konzentrationsverhältnissen n_{235}/n_{238} der Isotope in leichter und schwerer Fraktion gebildet wird:

$$\epsilon_A = \frac{(n_{235}/n_{238})_{\text{leichte Fraktion}}}{(n_{235}/n_{238})_{\text{schwere Fraktion}}} - 1 \quad (3)$$

Aus dem Trenneffekt ϵ_A , dem UF_6 -Durchsatz L_u durch das Trennelement und dem UF_6 -Abschälverhältnis ϑ_u berechnet sich die Trennleistung δU des Trennelementes

$$\delta U = \frac{1}{2} \epsilon_A^2 L_u \vartheta_u (1 - \vartheta_u) \quad (4)$$

Die Bewertung eines Trennversuches erfolgt in bekannter Weise über die spezifischen Aufwandsgrößen /6/.

3. Einfluß des Rückstaus auf das Betriebsverhalten toleranzfreier Trennelemente

An toleranzfreien Labortrennelementen wird in den folgenden Abschnitten dieses Kapitels untersucht, in welchem Bereich das UF_6 -Abschälverhältnis durch Rückstau der schweren Fraktion geregelt werden kann und wie der Regelbereich des UF_6 -Abschälverhältnisses von der Abschälerweite abhängt. Daran schließen sich Untersuchungen zum Einfluß des Rückstaus auf die Wirtschaftlichkeit der Uranisotopentrennung an, die zeigen, wie der Rückstau die Trennleistung der Trenndüse und den optimalen Betriebspunkt beeinflusst.

3.1 Einfluß auf das UF_6 -Abschälverhältnis bei verschiedenen Abschälerweiten

Das UF_6 -Abschälverhältnis einer Kaskadenstufe wird über ein Regelventil durch Drosseln des Gasstroms der schweren Fraktion eingestellt, wobei der Absaugdruck der leichten Fraktion vorgegeben ist.

In Abb. 4 wird für zwei typische Abschälerweiten gezeigt, wie der Gasdurchsatz L_s der schweren Fraktion das UF_6 -Abschälverhältnis ϑ_U und den Absaugdruck der schweren Fraktion beeinflusst. Der Absaugdruck der schweren Fraktion ist, wie üblich, auf den Absaugdruck der leichten Fraktion normiert und wird als dimensionsloses Rückstauverhältnis $R = P_s/P_1$ angegeben.

Es wird deutlich, daß bei kleinen Abschälerweiten das UF_6 -Abschälverhältnis beim Drosseln des Gasstroms der schweren Fraktion erwartungsgemäß kontinuierlich an-

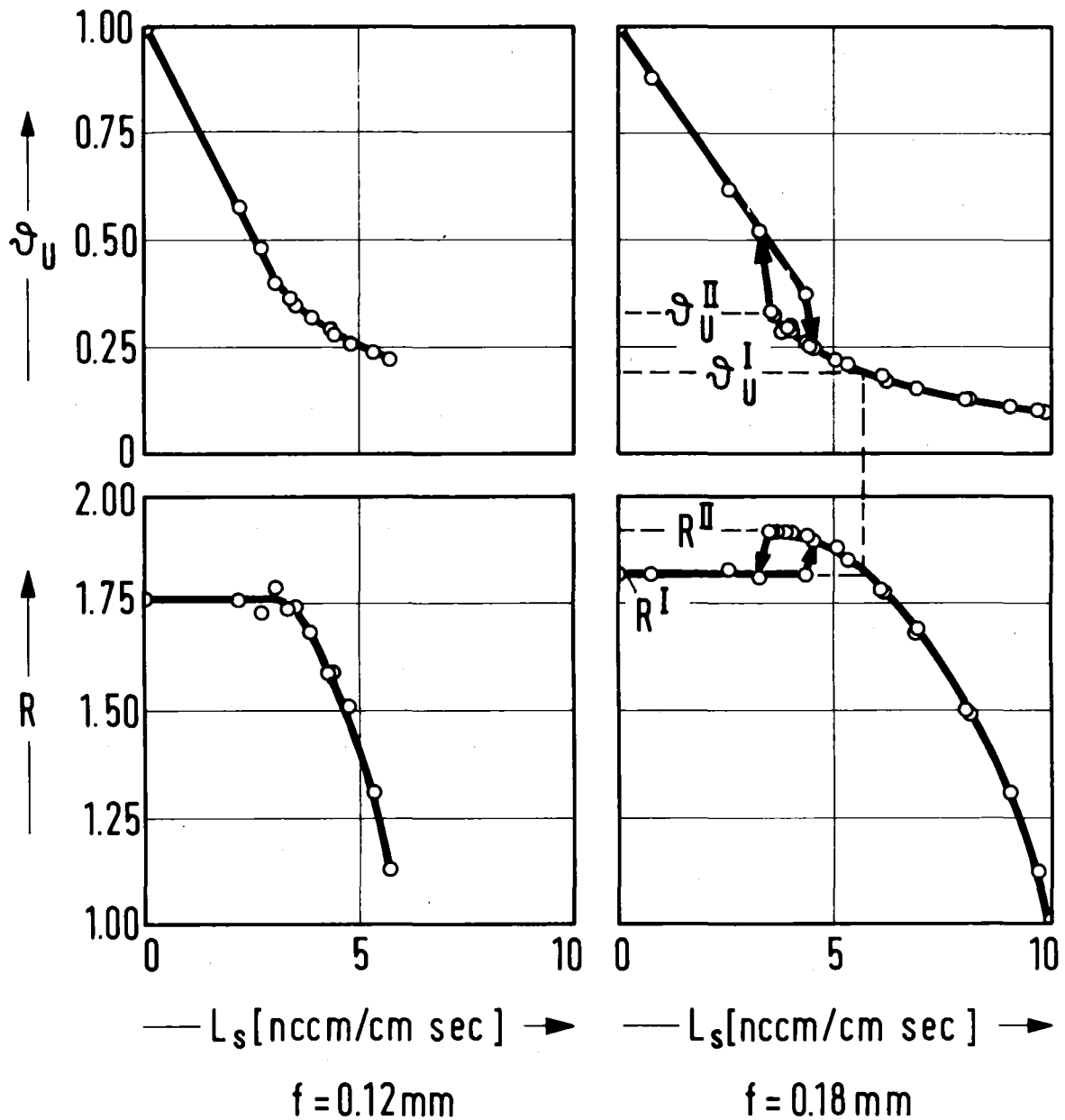


Abb. 4: Einfluß des Gasdurchsatzes L_s der schweren Fraktion auf das UF_6 -Abschälverhältnis S_U und das Rückstauverhältnis $R = P_s/P_1$ bei zwei typischen Abschälerweiten
 ($P_0 = 25 \text{ Torr}$, $P_0/P_1 = 2.35$, $N_0 = 4 \text{ Mol-\% UF}_6 \text{ in H}_2$).

steigt. Das Rückstauverhältnis nimmt mit abnehmendem Gasdurchsatz der schweren Fraktion zunächst steil zu. Sobald ein gewisser Gasdurchsatz bei der schweren Fraktion unterschritten wird, bleibt es konstant, d. h. der Druck in der schweren Fraktion kann durch weiteres Drosseln nicht weiter erhöht werden.

Bei großer Abschälerweite steigt das UF_6 -Abschälverhältnis und das Rückstauverhältnis zunächst beim Drosseln des Gasstromes der schweren Fraktion kontinuierlich bis zu den Werten \mathfrak{J}_U^{II} , R^{II} an. Ein weiteres Absenken des Gasdurchsatzes der schweren Fraktion bewirkt dann jedoch eine sprunghafte Zunahme des UF_6 -Abschälverhältnisses und eine sprunghafte Abnahme des Rückstauverhältnisses von R^{II} auf R^I . Bei weiterem Drosseln der schweren Fraktion steigt dann nur noch das UF_6 -Abschälverhältnis an, während das Rückstauverhältnis konstant bleibt. Wird der Gasdurchsatz durch die schwere Fraktion wieder erhöht, so reproduziert sich der Kurvenverlauf $\mathfrak{J}_U(L_s)$ und $R(L_s)$ im wesentlichen, wobei der Rücksprung hystereseartig verzögert ist.

Wegen des sprunghaften, hysteresebehafteten Verhaltens ist der Wert \mathfrak{J}_U^{II} als oberer Grenzwert für eine Regelung des UF_6 -Abschälverhältnisses durch Rückstau der schweren Fraktion anzusehen. Besonders einfach ist eine Regelung und eine Überwachung des UF_6 -Abschälverhältnisses in dem Bereich mit Rückstauverhältnissen $R < R^I$ und UF_6 -Abschälverhältnissen $\mathfrak{J}_U < \mathfrak{J}_U^I$, da hier ein eindeutiger Zusammenhang zwischen dem Gasdurchsatz der schweren Fraktion, dem Rückstauverhältnis und dem UF_6 -Abschälverhältnis vorliegt.

Abb. 5 zeigt den Einfluß der Abschälerweite f auf die Rückstauverhältnisse R^I , R^{II} sowie die dazugehörigen UF_6 -

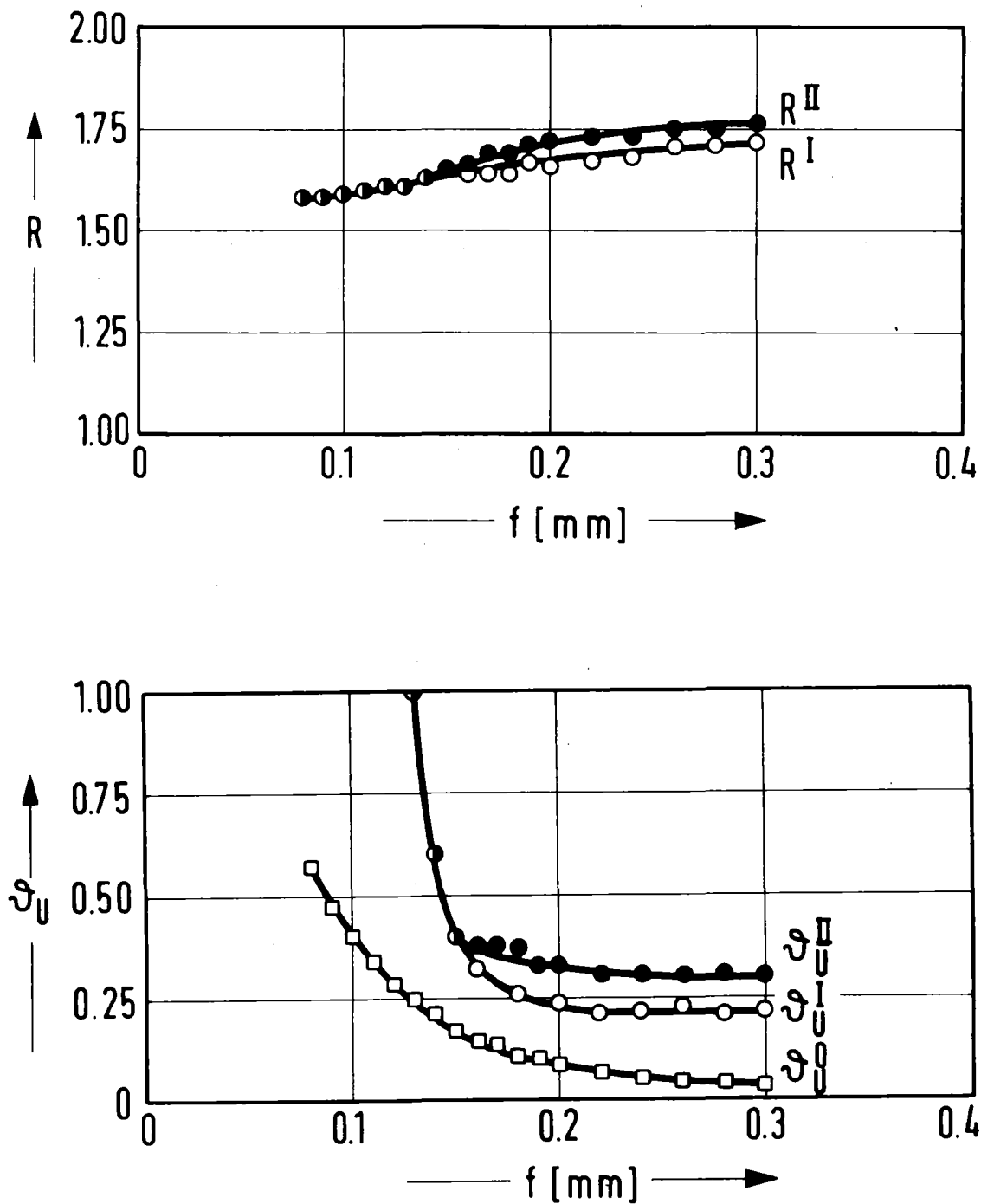


Abb. 5: Einfluß der Abschälerweite f auf die in Abb. 4 definierten Rückstauverhältnisse R^I , R^{II} und die Regelbereiche $\Delta_U^0 - \Delta_U^I$, $\Delta_U^0 - \Delta_U^{II}$ des UF_6 -Abschälverhältnisses ($P_0 = 22$ Torr, $P_0/P_s = 2.1$, $N_0 = 4$ Mol-% UF_6 in H_2).

Abschälverhältnisse \mathfrak{J}_U^I , \mathfrak{J}_U^{II} und das UF_6 -Abschälverhältnis \mathfrak{J}_U^0 , das sich jeweils ohne Rückstau der schweren Fraktion ($R = 1$) einstellt.

Man bemerkt, daß mit zunehmender Abschälerweite durch Drosseln der schweren Fraktion immer größere Rückstauverhältnisse R^I , R^{II} erzielt werden. Die dabei erreichten Grenzwerte des UF_6 -Abschälverhältnisses \mathfrak{J}_U^I , \mathfrak{J}_U^{II} verringern sich jedoch, so daß sich die Regelbereiche $\mathfrak{J}_U^0 - \mathfrak{J}_U^I$ bzw. $\mathfrak{J}_U^0 - \mathfrak{J}_U^{II}$ des UF_6 -Abschälverhältnisses mit zunehmender Abschälerweite zu kleineren \mathfrak{J}_U -Werten verschieben. Um durch Rückstau der schweren Fraktion ein UF_6 -Abschälverhältnis $\mathfrak{J}_U = 0.25$ einstellen zu können, muß die Abschälerweite größer als $f = 0.13$ mm sein. Andererseits sollte die Abschälerweite kleiner als $f = 0.19$ mm sein, damit der für eine Regelung günstige, eindeutige Zusammenhang von UF_6 -Abschälverhältnis und Rückstauverhältnis gewahrt ist.

3.2 Einfluß auf die Trenneigenschaften

In früheren Untersuchungen wurden die Betriebsparameter der Trenndüse bei gleichen Absaugdrücken von leichter und schwerer Fraktion optimiert /6/. Es wurde festgestellt, daß das in Abb. 2 gezeigte Laborelement bei dem Betriebspunkt ($P_0 = 21$ Torr, $P_0/P_1 = 2.1$, $N_0 = 4$ Mol-% UF_6 in H_2 , $\mathfrak{J}_U = 0.25$) mit dem geringsten spezifischen Energieverbrauch arbeitet.

Bei diesem Betriebspunkt wurde in der vorliegenden Arbeit der Einfluß des Rückstaus der schweren Fraktion auf die Trenneigenschaften der Trenndüse untersucht. Dabei war es am zweckmäßigsten, die Abschälerweite des Trennelementes schrittweise zu öffnen und den vorgegebenen

Sollwert für das UF_6 -Abschälverhältnis durch entsprechenden Rückstau der schweren Fraktion einzustellen.

Aus Abb. 6 geht hervor, daß man mit zunehmender Abschälerweite f das Rückstauverhältnis R zunächst sehr stark erhöhen muß, um $\mathfrak{J}_U = 0.25$ einzustellen. Bei größeren Abschälerweiten steigt das für $\mathfrak{J}_U = 0.25$ notwendige Rückstauverhältnis nur noch langsam an, obwohl der Ausgangswert \mathfrak{J}_U^0 des UF_6 -Abschälverhältnisses ohne Rückstau weiter abnimmt (Abb. 5).

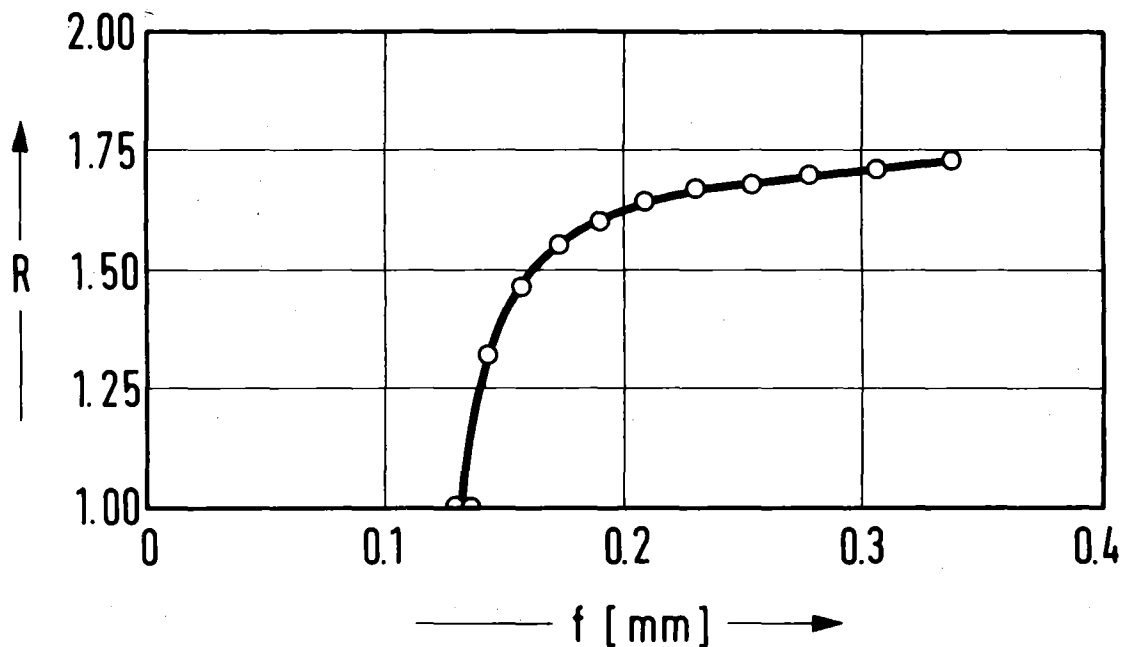


Abb. 6: Das zum Einstellen von $\mathfrak{J}_U = 0.25$ notwendige Rückstauverhältnis $R = P_s/P_1^U$ in Abhängigkeit von der Abschälerweite f
($P_0 = 21$ Torr, $P_0/P_1 = 2.1$, $N_0 = 4.2$ Mol-% UF_6 in H_2).

In Abb. 7 ist der Elementareffekt ϵ_A der Uranisotopentrennung, der Logarithmus des Gemischtrennfaktors $\ln A$ und der Gasdurchsatz L durch das Trennelement über dem Rückstauverhältnis $R = P_s/P_1$ dargestellt. Daraus geht hervor, daß sowohl der Elementareffekt der Uranisotopentrennung als auch der Gemischtrennfaktor mit zunehmendem Rückstauverhältnis ansteigen und bei $R = 1.6 - 1.7$ Maxima durchlaufen. Dabei verbessert sich der Elementareffekt der Uranisotopentrennung um $\Delta\epsilon_A/\epsilon_A \approx 4 - 5 \%$. Bei dem Gemischtrennfaktor beträgt der Anstieg bei Rückstau $\Delta \ln A / \ln A$ etwa 10 %. Im Betriebspunkt mit maximaler Entmischung beträgt die Abschälerweite $f = 0.19 - 0.22$ mm und ist somit ungefähr 40 - 60 % größer als die Abschälerweite, bei welcher ohne Rückstau der schweren Fraktion das UF_6 -Abschälverhältnis $\vartheta_U = 0.25$ erreicht wird. Der Gasdurchsatz durch das Trennelement bleibt im Rahmen der Meßgenauigkeit mit zunehmendem Rückstau der schweren Fraktion zunächst nahezu konstant. Erst bei Rückstauverhältnissen $R > 1.65$ und entsprechend großen Abschälerweiten zeigt sich eine schwache Abnahme des Gasdurchsatzes.

In dem wirtschaftlich günstigsten Bereich um den Betriebspunkt mit minimalem spezifischen Energieverbrauch wurde kein mit Sicherheit außerhalb der Fehlergrenze liegender Einfluß der Betriebsparameter auf den Rückstaugewinn im Isotopentrenneffekt festgestellt (Abb. 8). Sowohl bei Variation der UF_6 -Konzentration N_0 des Verfahrensgases, als auch bei Variation des Einlaßdruckes P_0 , des Expansionsverhältnisses P_0/P_1 der leichten Fraktion oder des UF_6 -Abschälverhältnisses ϑ_U wurde stets ein etwa 4 - 5 %iger Anstieg des Isotopentrenneffekts durch Rückstau beobachtet. Das bedeutet, daß sich die optimalen Betriebsbedingungen der Trenndüse in erster Näherung durch Rückstau der schweren Fraktion nicht verändern.

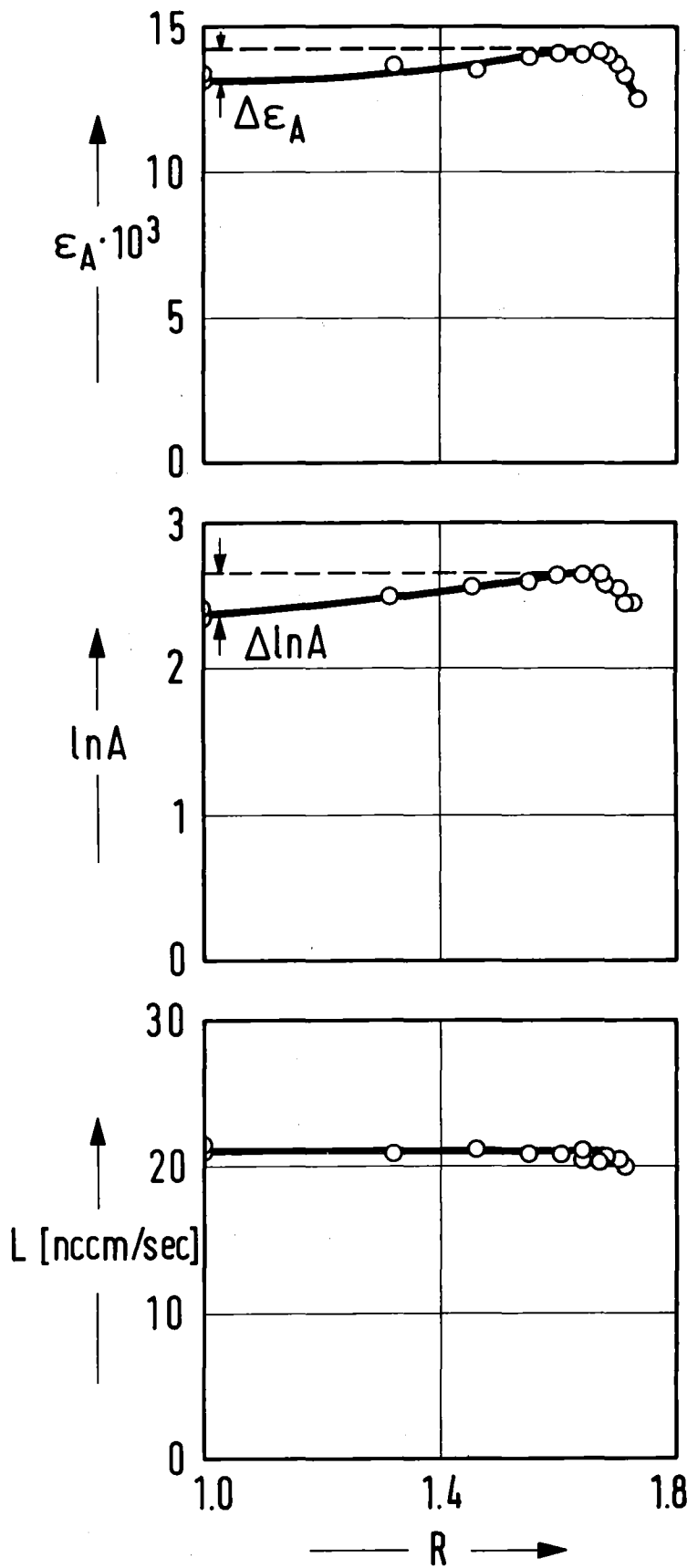


Abb. 7:

Einfluß des Rückstauverhältnisses $R = P_s/P_1$ auf den Elementareffekt ϵ_A der Isotopentrennung, den Logarithmus des Gemischtrennfaktors $\ln A$ und den Gasdurchsatz L

($P_0 = 21 \text{ Torr}$,
 $P_0/P_1 = 2.1$,
 $\delta_u = 0.25$,
 $N_0 = 4.2 \text{ Mol-\% UF}_6$
in H_2).

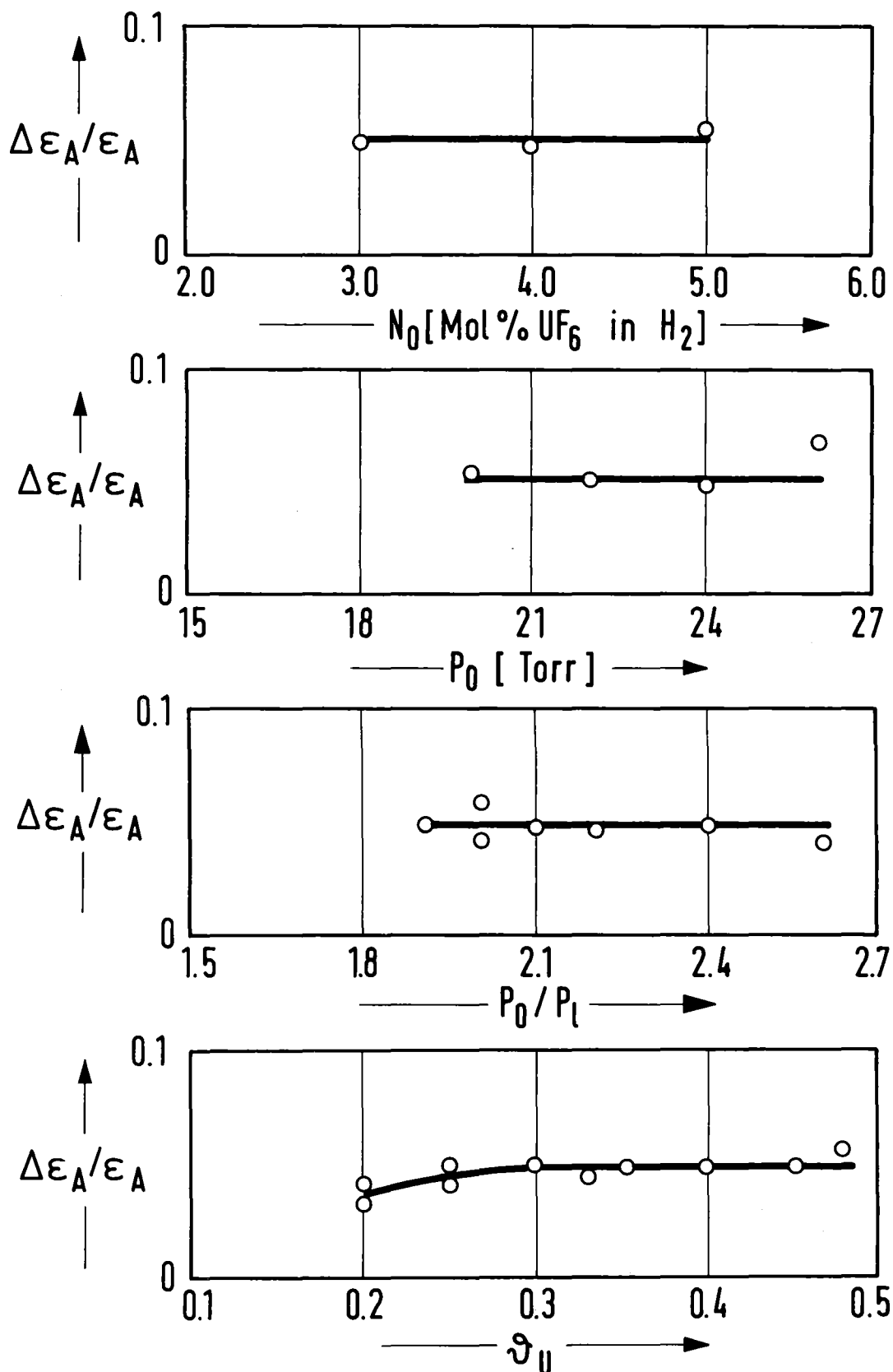


Abb. 8: Abhängigkeit des maximal möglichen Rückstaugewinns $\Delta\epsilon_A/\epsilon_A$ des Isotopentrenneffekts von der UF_6 -Konzentration N_0 des Verfahrensgases, dem Einlaßdruck P_0 , dem Expansionsverhältnis P_0/P_1 der leichten Fraktion und dem UF_6 -Abschälverhältnis ϑ_U . Die jeweils nicht-variierenden Betriebsparameter betragen $P_0 = 22$ Torr, $P_0/P_1 = 2.1$, $N_0 = 4$ Mol-% UF_6 in H_2 , $\vartheta_U = 0.25$.

Bei weiteren Trennexperimenten an toleranzfreien Laborelementen wurde die Abschälerhöhe in einem Bereich von -30 % bis +10 % um den optimalen Wert $h_f = 0.63$ mm variiert. Dabei ergab sich, daß die Abschälerhöhe im Rahmen der Meßgenauigkeit keinen Einfluß auf den 4 - 5 %igen Anstieg des Isotopentrenneffekts durch Rückstau hat. Ebenso wurde durch Trennexperimente an Elementen mit verschieden weiten, parallelen Düsengaskanälen ($a_o = a_{g0} = 0.3, 0.4$ mm) und einem Trenndüsenelement mit divergentem Düsengaskanal ($a_o = 0.3$ mm, $a_{g0} = 0.33$ mm) gezeigt, daß die Düsenkanalgeometrie keinen außerhalb der Meßgenauigkeit liegenden Einfluß auf den Rückstaugewinn im Isotopentrenneffekt hat¹⁾.

1) Daraus kann jedoch nicht allgemein gefolgert werden, daß die durch Rückstau der schweren Fraktion mögliche Verbesserung der Uranisotopentrennung in jedem Fall von der Trennelementgeometrie unabhängig ist. So vermindert beispielsweise ein langer Absaugkanal der leichten Fraktion oder, nach Messungen von F. Mikosch /8/, eine stumpfe Abschälerschneide den Rückstaugewinn im Isotopentrenneffekt.

4. Einfluß des Rückstaus auf das Betriebsverhalten toleranzbehafteter Trennelemente

In einer früheren Arbeit wurde untersucht, wie sich die für technische Trennelemente typischen Toleranzschwankungen der Abschälerweite, der Abschälerhöhe und der Düsenweite ohne Rückstau der schweren Fraktion auf die Uranisotopenentmischung auswirken /9/. Entsprechend wird im folgenden mit Modellrechnungen, die auf der Grundlage der an toleranzfreien Trennelementen gemessenen Abhängigkeiten der Trenneigenschaften durchgeführt wurden, untersucht, welche Auswirkungen diese Geometrieparameterschwankungen bei Rückstau auf die Uranisotopentrennung haben. Die Ergebnisse dieser Rechnungen werden mit Ergebnissen von Trennversuchen an toleranzbehafteten Trennelementen verglichen.

4.1 Berechnung der zu erwartenden Vermischungsverluste

Nimmt man an, daß die Verschlechterung der Uranisotopentrennung durch Geometrieparameterschwankungen nur auf die lokal unterschiedlichen Uranisotopenkonzentrationen in den Absaugkanälen von schwerer und leichter Fraktion zurückzuführen ist, kann man den Einfluß von Geometrieparameterschwankungen auf den Elementareffekt der Uranisotopentrennung wie bei einer rückwirkungsfreien Parallelschaltung von Trennelementen mit unterschiedlichen Geometrien behandeln. Bezeichnet man die Verteilungsfunktion für die Toleranzschwankungen des Geometrieparameters x entlang der Schlitzlänge mit $g(x)$, so kann man den Mittelwert $\hat{\epsilon}_A$ für den Isotopentrenneffekt mit den Integralen (5), (6) aus den an toleranzfreien

$$\hat{\epsilon}_A = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} \epsilon_A(x) L(x) \mathfrak{D}_U(x) (1 - \mathfrak{D}_U(x)) g(x) dx}{\int_{-\infty}^{+\infty} L(x) \hat{\mathfrak{D}}_U (1 - \hat{\mathfrak{D}}_U) g(x) dx} \quad (5)$$

$$\hat{\mathfrak{D}}_U = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} \mathfrak{D}_U(x) L(x) g(x) dx}{\int_{-\infty}^{+\infty} L(x) g(x) dx} \quad (6)$$

Trennelementen gemessenen Abhängigkeiten des Uranisotopentrenneffekts $\epsilon_A(x)$, des UF_6 -Abschälverhältnisses $\mathfrak{D}_U(x)$ und des Gasdurchsatzes $L(x)$ berechnen.

Abb. 9 zeigt die Ergebnisse von Modellrechnungen zum Einfluß von Schwankungen der Abschälerweite Δf , der Abschälerhöhe Δh_f und der Düsenweite Δa auf die Trenneigenschaften ohne Rückstau, bei optimalem Rückstau und bei konstantem Rückstauverhältnis $R = 1.5$ für das UF_6 -Abschälverhältnis $\mathfrak{D}_U = 0.25$.²⁾ Zur Kennzeichnung der Trenneigenschaften wird der dimensionslose Trenneffektwirkungsgrad η_{ϵ_A} verwendet, der sich durch Normierung des Isotopentrenneffekts des toleranzbehafteten Trennelements auf den Isotopentrenneffekt des toleranzfreien Trennelements ohne Rückstau ergibt. Den Rechnungen ist eine Gauß-Verteilung mit der Schwankungsbreite $\sigma = \Delta f$, Δh_f , Δa als Verteilungsfunktion für die Schwankungen zugrundegelegt.

2) Dazu wurde bei den Rechnungen berücksichtigt, daß die zur Einstellung eines vorgegebenen UF_6 -Abschälverhältnisses erforderliche mittlere Abschälerweite sowohl von dem Rückstauverhältnis als auch von der Geometrieparameterschwankung abhängt, da das mittlere UF_6 -Abschälverhältnis im allgemeinen mit zunehmender Schwankungsbreite eines Geometrieparameters ansteigt.

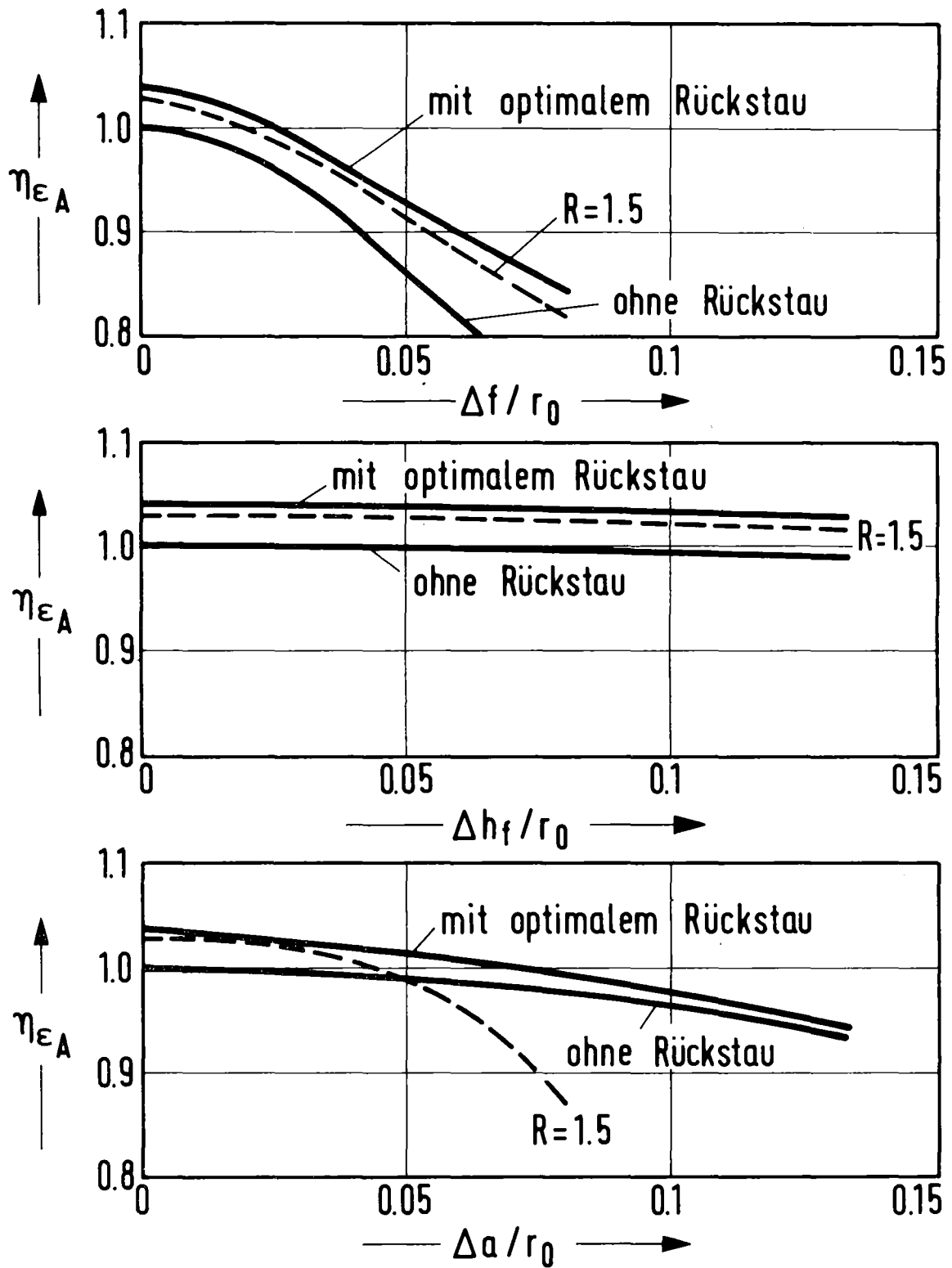


Abb. 9: Ergebnisse von Modellrechnungen zum Einfluß von gaußförmig um den Sollwert verteilten Schwankungen Δf der Abschälerweite, Δh_f der Abschälerhöhe und Δa der Düsenweite auf den Trenneffektwirkungsgrad $\eta_{\epsilon A}$ ($P_o = 22$ Torr, $P_o/P_1 = 2.1$, $N_o = 4$ Mol-% UF_6 in H_2 , $\vartheta_u = 0.25$).

Mit zunehmender Schwankungsbreite der Abschälerweite nimmt der Trenneffektwirkungsgrad rasch ab, wobei die Abnahme zunächst vom Rückstau der schweren Fraktion unabhängig ist. Bei großer Schwankungsbreite ($\Delta f/r_0 > 0.05$) ist die Abnahme des Trenneffektwirkungsgrades jedoch bei Rückstau geringer als ohne Rückstau, d. h. durch Rückstau wird der schädliche Einfluß von Schwankungen der Abschälerweite reduziert.

Schwankungen der Abschälerhöhe bewirken, mit und ohne Rückstau der schweren Fraktion, nur eine geringfügige Abnahme des Trenneffektwirkungsgrades. Ein Einfluß der Abschälerhöhenschwankung auf die Verbesserung des Trenneffektwirkungsgrades durch Rückstau ist nicht erkennbar.

Im Gegensatz zu den Toleranzschwankungen der Abschälerweite und der Abschälerhöhe, welche das optimale Rückstauverhältnis von $R = P_s/P_1 \approx 1.6$ kaum beeinflussen, wird das optimale Rückstauverhältnis mit zunehmender Schwankungsbreite der Düsenweite kleiner. Dies führt zu einer Verminderung des Rückstaugewinns.

Bei konstantem Rückstauverhältnis $R = 1.5$ nimmt der Trenneffektwirkungsgrad mit zunehmender Düsenweiteschwankung zunächst geringfügig ab. Bei $\Delta a/r_0 = 0.02 - 0.025$ entspricht $R = 1.5$ gerade dem optimalen Rückstauverhältnis, so daß hier die Kurven für optimalen Rückstau und $R = 1.5$ zusammenlaufen. Bei Schwankungen der Düsenweite, welche größer als $\Delta a/r_0 = 0.025$ sind, ist das Rückstauverhältnis $R = 1.5$ größer als der optimale Wert und der Trenneffektwirkungsgrad nimmt steil ab. Das bedeutet, daß zu starker Rückstau die durch Düsenweiteschwankungen hervorgerufenen Wirkungsgradver-

luste verstärken kann, und daß es zu ähnlich massiven Wirkungsgradverlusten wie bei Toleranzschwankungen der Abschälerweite kommen kann.

4.2 Trennversuche an toleranzbehafteten Trennelementen

Um zu überprüfen, ob bei Toleranzschwankungen von Geometrieparametern, über die Vermischungsverluste in den Absaugkanälen von schwerer und leichter Fraktion hinaus, weitere wesentliche Verlustprozesse auftreten, wurden an toleranzbehafteten Trennelementen Trennversuche durchgeführt. Zur Simulation der Geometrieparameterschwankungen wurde entweder das Abschälerblech oder das Düsenblech gegenüber der Umlenkwand schräg justiert. Dadurch variierte dann die Abschälerweite, die Abschälerhöhe oder die Düsenweite linear über der Schlitzlänge des Trennelements um ihren Sollwert. Damit der Einfluß der Toleranzschwankungen auf die Uranisotopentrennung bei Rückstau der schweren Fraktion, trotz der Kleinheit des Rückstaueffekts, deutlich erkennbar wird, wurden die Schwankungsbreiten der Geometrieparameter mit $\Delta f/r_0 = 0.056$, $\Delta h_f/r_0 = 0.133$, $\Delta a/r_0 = 0.133$ bewußt größer gewählt, als es bei technischen Trennelementen der Fall ist. Die relative Schwankung um den Sollwert beträgt bei der Abschälerweite $\Delta f/f \approx \pm 20 - 30 \%$, bei der Abschälerhöhe $\Delta h_f/h_f \approx \pm 15 \%$ und bei der Düsenweite $\Delta a/a \approx \pm 30 \%$.

Abb. 10 zeigt, daß mit zunehmendem Rückstauverhältnis $R = P_s/P_1$, sowohl bei dem Trennelement mit Schwankungen der Abschälerweite als auch bei dem Trennelement mit Schwankungen der Abschälerhöhe, der Elementareffekt ϵ_A der Uranisotopentrennung ansteigt. Wie beim toleranz-

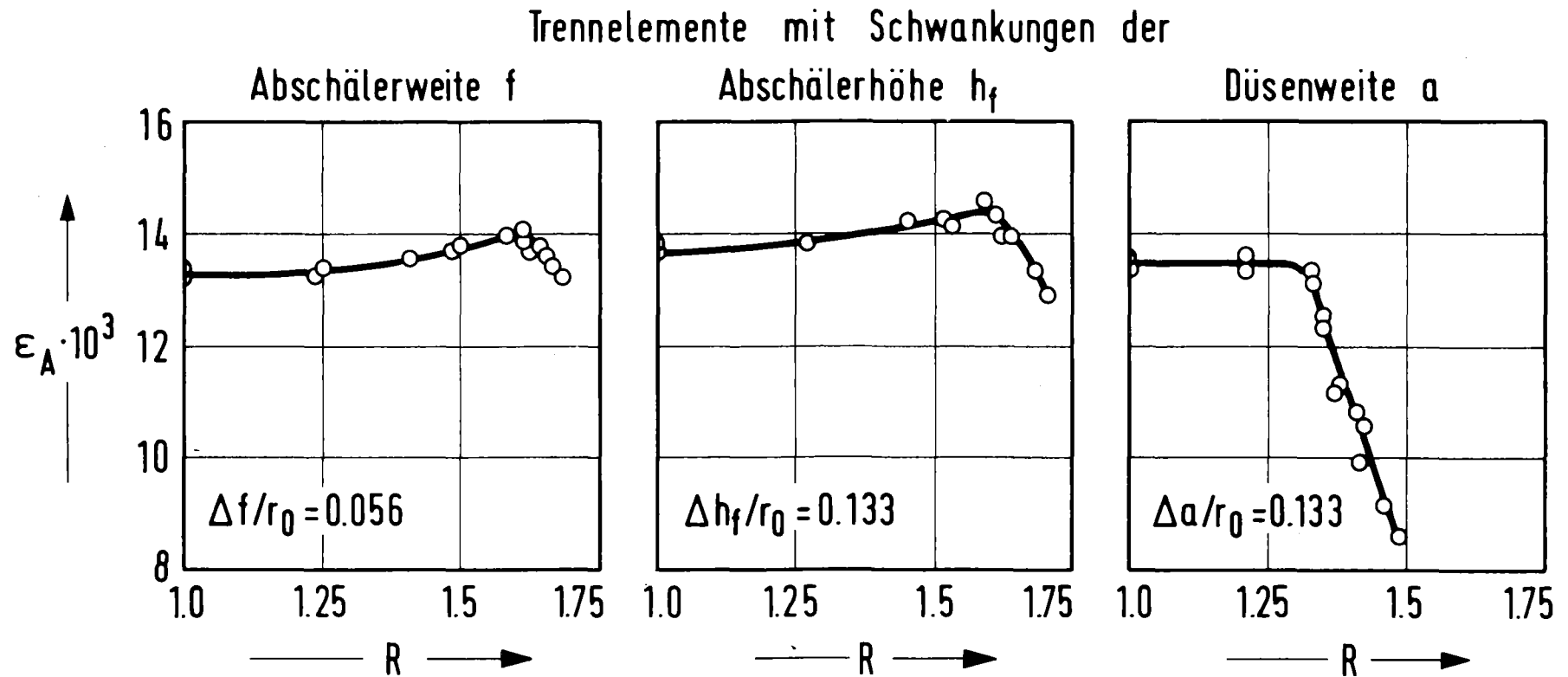


Abb. 10: Einfluß des Rückstauverhältnisses $R = P_s/P_1$ auf den Elementareffekt ϵ_A der Uranisotopentrennung bei toleranzbehafteten Trennelementen

($P_0 = 22$ Torr, $P_0/P_1 = 2.1$, $N_0 = 4$ Mol-% UF_6 in H_2 , $\mathfrak{J}_u = 0.25$).

freien Trennelement durchläuft der Isotopentrenneffekt bei $R \approx 1.6$ ein Maximum. Der Anstieg des Isotopentrenneffekts beträgt, ebenfalls wie beim toleranzfreien Trennelement, ungefähr 4 - 5 %.

Im Gegensatz dazu wird bei dem Trennelement mit Düsenweitenschwankung keine Verbesserung der Uranisotopentrennung durch Rückstau der schweren Fraktion gemessen. Mit zunehmendem Rückstauverhältnis bleibt der Isotopentrenneffekt zunächst bis $R \approx 1.3$ konstant und nimmt dann bei $R > 1.3$ rasch ab.

In der Tabelle 1 werden die gemessenen Trenneffektwirkungsgrade mit den entsprechenden nach den Gleichungen (5) und (6) berechneten Werten verglichen.

Der Vergleich macht deutlich, daß die Rechnungen im allgemeinen etwa 2 % höhere Werte für den Trenneffektwirkungsgrad liefern als die Messungen. Da die Meßgenauigkeit für den Trenneffektwirkungsgrad etwa 1 - 2 % beträgt, ist die Übereinstimmung von Rechnung und Experiment befriedigend genau.³⁾ Insbesondere bei dem Einfluß der Geometrieparameterschwankungen auf den durch Rückstau möglichen Anstieg des Trenneffektwirkungsgrades zeigt sich sowohl bei den Rechnungen als auch bei den Messungen übereinstimmend, daß Schwankungen der Düsenweite im Gegensatz zu Schwankungen der Abschälerweite oder der Abschälerhöhe den durch Rückstau möglichen Anstieg des Trenneffektwirkungsgrades vermindern.

³⁾ Wegen des großen zeitlichen Abstandes von mehr als einem Jahr zwischen den Messungen an dem toleranzfreien Trennelement und an den toleranzbehafteten Trennelementen ist jedoch offen, ob die gefundene Diskrepanz nicht auf einen systematischen Fehler, wie z. B. eine geringfügige Langzeitdrift eines Meßgerätes, zurückgeführt werden kann.

| Trennelement | Trenneffektwirkungsgrad | | | | | |
|---|--------------------------|----------|---------------------------|----------|---------------------------|----------|
| | ohne Rückstau (R = 1) | | mit optimalem Rückstau | | Anstieg durch Rückstau | |
| | Messung | Rechnung | Messung | Rechnung | Messung | Rechnung |
| ohne Toleranzen | | 1 | | 1.04 | | 0.04 |
| mit variierender Abschälerweite $\Delta f/r_o = 0.056$ | 0.93 | 0.95 | 0.98 | 0.99 | 0.05 | 0.04 |
| mit variierender Abschälerhöhe $\Delta h_f/r_o = 0.133$ | 0.97 | 0.99 | 1.01 | 1.03 | 0.04 | 0.04 |
| mit variierender Düsenweite $\Delta a/a = 0.133$ | 0.96 | 0.98 | 0.96 | 1.00 | 0 | 0.02 |

Tabelle 1: Vergleich der gemessenen und der nach den Gleichungen (5) und (6) berechneten Trenneffektwirkungsgrade für toleranzbehaftete Trennelemente mit linear über der Schlitzlänge variierender Abschälerweite, Abschälerhöhe, Düsenweite

($P_o = 22$ Torr, $P_o/P_1 = 2.1$, $N_o = 4$ Mol-% UF_6 in H_2 , $\vartheta_u = 0.25$).

5. Einfluß des Rückstaus auf die Regelcharakteristik des UF_6 -Abschälverhältnisses

Das Betriebsverhalten einer Trenndüsenkaskade wird wesentlich durch den UF_6 -Transport in der Kaskade bestimmt. Somit hängt die Reaktion der Trenndüsenkaskade bei Regeleingriffen oder Betriebsstörungen davon ab, wie sich die dabei auftretenden Änderungen der Betriebsparameter auf das UF_6 -Abschälverhältnis auswirken /5/, mit welchem die UF_6 -Strömung im Trennelement in den kaskadenaufwärtsgerichteten Gasstrom der leichten Fraktion und den kaskadenabwärtsgerichteten Gasstrom der schweren Fraktion aufgeteilt wird. Es wird daher anhand der partiellen Ableitungen des UF_6 -Abschälverhältnisses nach den verschiedenen Betriebsparametern (N_o , P_o , P_o/P_1 , P_o/P_s) untersucht, ob und wie der Rückstau der schweren Fraktion die Regelcharakteristik des UF_6 -Abschälverhältnisses beeinflußt.

Dazu wurde in dem Betriebspunkt ($P_o = 22$ Torr, $P_o/P_1 = 2.1$, $N_o = 4$ Mol-% UF_6 in H_2 , $\vartheta_u = 0.25$) jeweils einer der Betriebsparameter variiert und die Abhängigkeit des UF_6 -Abschälverhältnisses von diesem Parameter gemessen. Für diese Abhängigkeit wurde dann eine Ausgleichskurve bestimmt, welche in dem obigen Betriebspunkt nach dem betreffenden Betriebsparameter differenziert wurde.

Aus Abb. 11 geht hervor, daß mit zunehmendem Rückstauverhältnis $R = P_s/P_1$ alle partiellen Ableitungen des UF_6 -Abschälverhältnisses kleiner werden. Dabei ist der Einfluß des Rückstaus der schweren Fraktion bei der partiellen Ableitung des UF_6 -Abschälverhältnisses nach dem Expansionsverhältnis der schweren Fraktion erwartungsgemäß am größten, während der Rückstau auf die partielle

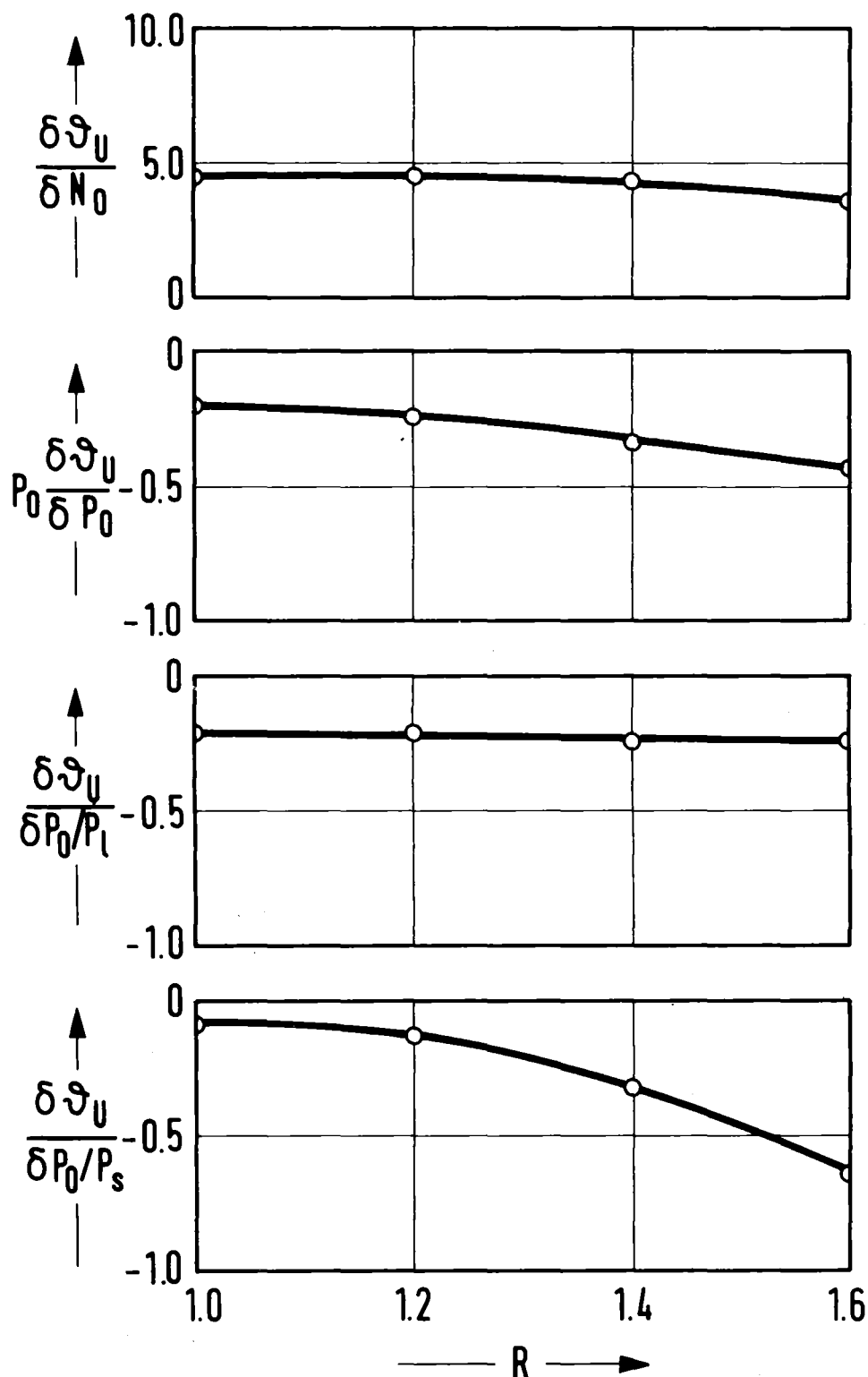


Abb. 11: Einfluß des Rückstauverhältnisses $R = P_0/P_1$ auf die partiellen Ableitungen des UF_6 -Ab-schälverhältnisses ϑ_U nach der UF_6 -Konzentration N_0 des Verfahrensgases, dem Einlaßdruck P_0 und den Expansionsverhältnissen P_0/P_1 , P_0/P_s von leichter und schwerer Fraktion ($P_0 = 22$ Torr, $P_0/P_1 = 2.1$, $N_0 = 4$ Mol-% UF_6 in H_2 , $\vartheta_U = 0.25$).

Ableitung des UF_6 -Abschälverhältnisses nach dem Expansionsverhältnis der leichten Fraktion nur einen geringen Einfluß hat. Da durch Rückstau der positive Parameter $\partial \vartheta_u / \partial N_o$ betragsmäßig abnimmt und die negativen Parameter $P_o \partial \vartheta_u / \partial P_o$, $\partial \vartheta_u / \partial P_o / P_1$, $\partial \vartheta_u / \partial P_o / P_s$ betragsmäßig größer werden, ist bei einer genauen Analyse des Betriebsverhaltens einer Trenndüsenkaskade⁴⁾ zu berücksichtigen, daß das UF_6 -Abschälverhältnis mit zunehmendem Rückstau immer unempfindlicher auf Änderungen der UF_6 -Konzentration des Verfahrensgases und immer empfindlicher auf Änderungen des Einlaßdrucks oder der Expansionsverhältnisse von schwerer und leichter Fraktion reagiert.

Weitere Trennexperimente machten deutlich, daß die partiellen Ableitungen des UF_6 -Abschälverhältnisses mit zunehmendem UF_6 -Abschälverhältnis betragsmäßig größer werden. Dies ist darauf zurückzuführen, daß mit zunehmendem UF_6 -Abschälverhältnis die radiale UF_6 -Verteilung im Abschälerbereich steiler wird. Bei einem typischen Rückstauverhältnis $R = 1.4$ liegt die betragsmäßige Zunahme bzw. Abnahme der Parameter beim Übergang von $\vartheta_u = 0.25$ nach 0.33 bzw. 0.5 in der Größenordnung von 10 - 20 %.

Darüber hinaus wurde am Beispiel von Toleranzschwankungen der Abschälerweite der Einfluß von Geometrie-

4) Nach Untersuchungen von R. Schütte /5/ wirkt sich die Abnahme des Parameters $\partial \vartheta_u / \partial P_o / P_s$ bei geeigneter Durchflußcharakteristik des Rückstauventils in der schweren Fraktion günstig auf das Stabilitätsverhalten der Kaskade aus, während die Abnahme der Parameter $\partial \vartheta_u / \partial N_o$, $P_o \partial \vartheta_u / \partial P_o$, $\partial \vartheta_u / \partial P_o / P_1$ einen ungünstigen Einfluß haben kann.

parameterschwankungen auf die partiellen Ableitungen des UF_6 -Abschälverhältnisses bei Rückstau der schweren Fraktion untersucht. Bei den Rechnungen, die analog zu Kapitel 4.1 durchgeführt wurden, stellte sich heraus, daß die partiellen Ableitungen des UF_6 -Abschälverhältnisses mit zunehmender Schwankungsbreite der Abschälerweite betragsmäßig kleiner werden. Die betragsmäßige Abnahme der Parameter wird durch Rückstau verstärkt. Für das Rückstauverhältnis $R = 1.4$ beträgt der Unterschied zwischen einem toleranzbehafteten ($\Delta f/r_0 = 0.067$) und einem toleranzfreien Trennelement ungefähr 5 %.

6. Diskussion der Ergebnisse

Aus den Untersuchungen dieser Arbeit geht hervor, daß durch Rückstau der schweren Fraktion der Elementareffekt der Uranisotopentrennung bis zu 5 % ansteigt. Dieser Rückstaugewinn im Isotopentrenneffekt vermindert sich bei Toleranzschwankungen der Düsenweite, während sich Schwankungen der Abschälerweite und der Abschälerhöhe innerhalb der Meßgenauigkeit nicht ungünstig auf den Rückstaugewinn auswirken. Bei den Rechnungen zum Einfluß von Abschälerweitenschwankungen, welche bei nicht zurückgestauter Strömung die Uranisotopenentmischung am massivsten beeinträchtigen, zeigt sich bei großen Schwan-
kungsbreiten sogar die Tendenz, daß die Verbesserung des Uranisotopentrenneffekts durch Rückstau zunimmt. Weiterhin ändert sich die Regelcharakteristik des UF_6 -Abschälverhältnisses so, daß das UF_6 -Abschälverhältnis bei einer zurückgestauten Strömung empfindlicher auf Änderungen des Einlaßdrucks oder der Expansionsverhältnisse von schwerer und leichter Fraktion, hingegen auf Änderungen der UF_6 -Konzentration des Verfahrensgases weniger empfindlich als ohne Rückstau reagiert.

Zur Erklärung dieses Betriebsverhaltens der Trenndüse bei Rückstau der schweren Fraktion kann man von folgenden Modellvorstellungen ausgehen: Bei Drosselung des Gasdurchsatzes der schweren Fraktion wird im Bereich der schweren Fraktion dynamischer Druck in statischen Druck umgesetzt und der Absaugdruck der schweren Fraktion steigt an. Dies wirkt sich bis auf die Strömungsbereiche vor dem Abschäler aus und vergrößert dort den radialen Unterschied im statischen Druck /10/. Dies ist mit einer Erhöhung des entmischenden Zentrifugalfeldes gleichbedeutend. Bei starkem Rückstau kann der Absaugdruck der schweren Fraktion über den Gesamtdruck am Außenrand der Strömung ansteigen,

so daß die Strömung von der Umlenkwand ablöst und sich zwischen Strömung und Umlenkwand ein Gaspolster ausbildet. Da sich der Gesamtdruck bei der Trenndüse in dem Bereich vor dem Abschäler nur noch wenig mit dem Umlenkwinkel ändert, genügt bereits eine geringe Änderung des Absaugdrucks der schweren Fraktion oder der Reibungsverluste, um den Ablösepunkt weit in azimuthaler Richtung zu verschieben /10/. Dies hat dann eine wesentlich stärkere radiale Verschiebung der Stromflächen am Abschäler zur Folge als bei einer Strömung, die an der Umlenkwand anliegt. Bei starkem Rückstau wird die Strömung jedoch nicht nur in radialer Richtung verschoben, sondern sie spreizt auch auf, wie aus den Messungen zum Einfluß der Abschälerweite auf das UF_6 -Abschälverhältnis hervorgeht.

Nach diesen Modellvorstellungen erklärt sich die Verbesserung der Gemisch- und Uranisotopentrennung durch Rückstau unmittelbar aus der Erhöhung des entmischenden Zentrifugalfeldes in dem Strömungsbereich vor dem Abschäler. Die Abnahme des Isotopentrenneffekts bei zu starkem Rückstau beruht möglicherweise auf einer Verschlechterung der Absaugbedingungen der leichten Fraktion, da durch die bei starkem Rückstau erforderlichen großen Abschälerweiten (Abb. 6) der Absaugquerschnitt der leichten Fraktion deutlich verringert wird. Ebenso könnte die schwache Abnahme des Gasdurchsatzes bei Rückstauverhältnissen $R > 1.65$ (Abb. 7) oder der etwas geringere Rückstaugewinn im Isotopentrenneffekt bei dem Uranabschälverhältnis $\mathfrak{J}_U = 0.2$ (Abb. 8) durch die ungünstigen Absaugbedingungen der leichten Fraktion bei Rückstau erklärt werden.

Der unterschiedliche Einfluß von Schwankungen von Geometrieparametern auf den Anstieg des Trenneffektwirkungsgrads durch Rückstau kann im Rahmen dieses Modells durch den Einfluß der Reynolds-Zahl auf die Rückstaufähigkeit der

der schweren Fraktion beschrieben werden. Dies soll für den Fall einer durch starken Rückstau abgelösten Strömung näher erläutert werden. Mit steigender Reynolds-Zahl nehmen die Reibungsverluste ab und die Ablösestelle verlagert sich stromabwärts zu größeren Umlenkwinkeln. Dadurch werden bei Geometrieparameterschwankungen, welche sich wie die Düsenweite auf die Reynolds-Zahl auswirken, durch Rückstau Schwankungen des UF_6 -Abschälverhältnisses über der Schlitzlänge des Trennelements erzeugt, und es entstehen in den Absaugkanälen von schwerer und leichter Fraktion zusätzliche Schwankungen der Uranisotopenkonzentrationen. Diese bewirken Mischungsverluste, durch die der Trenneffektwirkungsgrad zusätzlich herabgesetzt wird, so daß der maximal mögliche Rückstaugewinn im Trenneffektwirkungsgrad kleiner wird.

Bei Schwankungen der Abschälerweite und der Abschälerhöhe tritt dieser Verlustmechanismus, da sich die Abschälerposition nicht auf die Reynolds-Zahl auswirkt, nicht auf und der Trenneffektwirkungsgrad erhöht sich durch Rückstau analog wie beim toleranzfreien Trennelement. Durch das Aufspreizen der UF_6 -Strömung bei starkem Rückstau werden die von Abschälerweitenschwankungen in Schlitzrichtung des Elements verursachten Änderungen des UF_6 -Abschälverhältnisses sogar reduziert und die Verluste dementsprechend verringert. Dadurch vergrößert sich der Anstieg des Trenneffektwirkungsgrades, der durch Rückstau möglich ist.

Der Einfluß des Rückstaus auf die Regelcharakteristik des UF_6 -Abschälverhältnisses kann ebenfalls auf den Einfluß der Reynolds-Zahl auf die Rückstaufähigkeit der schweren Fraktion zurückgeführt werden: Mit zunehmender UF_6 -Konzentration des Verfahrensgases, steigendem Einlaßdruck oder steigendem Expansionsverhältnis der leichten Fraktion steigt die Reynolds-Zahl an. Dadurch verlagert sich der Ablösepunkt bei einer stark zurückgestauten Strömung strom-

abwärts und die ganze Strömung verschiebt sich radial nach außen. Das UF_6 -Abschälverhältnis nimmt im Vergleich zu einer nicht abgelösten Strömung ab und die partiellen Ableitungen des UF_6 -Abschälverhältnisses nach den Betriebsgrößen sind kleiner als ohne Rückstau.

Die Untersuchungen machen deutlich, daß der Rückstau der schweren Fraktion über die Möglichkeit, das UF_6 -Abschälverhältnis zu regeln, hinaus auch wirtschaftlich Vorteile bieten kann: Die Trennleistung der Trenndüse erhöht sich bis zu 10 %. Die spezifischen Aufwandsgrößen nehmen um den gleichen Betrag ab. Bei zusätzlicher Ausnutzung des erhöhten Absaugdrucks der schweren Fraktion könnte der spezifische Energieverbrauch durch Rückstau der schweren Fraktion sogar bis zu 20 % abgesenkt werden. Bei der praktischen Ausnutzung der höheren Trennleistung durch starken Rückstau ist allerdings auch zu berücksichtigen, daß durch Schwankungen von Geometrieparametern des Trennelements bei der Uranisotopentrennung Verluste entstehen, die unter Umständen durch Rückstau verstärkt werden können, oder daß der Rückstau die für das Betriebsverhalten der Kaskade wesentliche Regelcharakteristik des UF_6 -Abschälverhältnisses ungünstig beeinflussen kann.

Herrn Prof. Dr. E. W. Becker danken wir für das Interesse an dieser Arbeit und für wertvolle Diskussionen.

7. Literaturverzeichnis

- /1/ Becker, E.W., Bier, W., Ehrfeld, W., Schubert, K., Schütte, R. und Seidel, D.: Physics and Technology of Separation Nozzle Process. Proceedings of the Paris Conference, Progress in Nuclear Energy Series 1976, Pergamon Press, Oxford and New York
- /2/ Becker, E.W., Bier, W., Ehrfeld, W. und Eisenbeiß, G.: Die physikalischen Grundlagen der Uran-235-Anreicherung nach dem Trenndüsenverfahren - Die Wirkung des leichten Zusatzgases. Z. f. Naturforsch. 26a (1971) S. 1377
- /3/ Berkahn, W., Ehrfeld, W. und Krieg G.: Berechnung der Uranisotopenentmischung in der Trenndüse bei kleinen UF_6 -Molenbrüchen im Zusatzgas. KFK 2351 (1976)
- /4/ Becker, E.W., Bier, W., Fritz, W., Happe, P., Plesch, D., Schubert, K., Schütte, R. und Seidel, D: Current Status of Separation Nozzle Technology. Proceedings of the International Conference on Uranium Isotope Separation, London 5. - 7. März 1975
- /5/ Schütte, R.: Das gasdynamische Betriebsverhalten und die Kriterien der inhärenten Stabilität von Trenndüsenkaskaden zur U-235-Anreicherung. KFK 1986 (1974)
- /6/ Bley, P., Ehrfeld, W., Jäger, F.M., Knapp, U.: Entwicklung und Erprobung einer Versuchsanlage für die Optimierung von Trenndüsenanlagen zur Anreicherung von Uran-235. KFK 2092 (1975)
- /7/ Bley, P., Ehrfeld, W., Jäger, F.M., Knapp, U.: Meßtechnik und Versuchsstrategie bei Optimierung von Trenndüsenanlagen zur Anreicherung von Uran-235. Reaktortagung, Nürnberg, 8. - 11. April 1975
- /8/ Heibrock, H., Mikosch, F.: Untersuchung des Trennverhaltens einer klassischen Trenndüse mit unterschiedlich breiten stumpfen und abgerundeten Abschälerspitzen (1977) unveröffentlicht

- / 9/ Bier, W., Weis, F.: Einfluß der geometrischen Parameter auf die Leistung von Trenndüsenelementen. Kerntechnik, 14 (1972) S. 105

- /10/ Ehrfeld, U.: Drucksondenmessungen zum Einfluß des Rückstaus der schweren Fraktion auf die Strömung in der klassischen Trenndüse bei Verwendung eines He/SF₆-Gemisches (1976) unveröffentlicht